

Durchflussmessungen an dynamischen, naturnahen Gewässerabschnitten

Jens Wyrwa und Frank Schumacher

Pegelstandorte, die zur Durchflussmessung verwendet werden, müssen bisher in geraden, gleichförmigen Gewässerabschnitten liegen. Am Beispiel des Pegel Marburg an der Lahn wird der Einfluss eines Ufergebüsches und einer Kiesbank diskutiert. Mit dem 3D-Verfahren **casu** wird dazu das Geschwindigkeitsprofil im Messquerschnitt simuliert. Dies erlaubt es den Einfluss naturnaher, dynamischer Gewässerstrukturen auf die Durchflussermittlung zu bestimmen. Die Übernahme der Simulationsergebnisse in die Kalibrierung der Messeinrichtung eröffnet die Möglichkeit ohne aufwendige Unterhaltungsmaßnahmen und an naturnahen Gewässerabschnitten Durchflüsse kontinuierlich zu messen.

Durchflussmessung, Pegelkalibrierung, CFD, 3D-Strömungssimulation

1 Einleitung

Die Lage von Durchflussmessstellen, wie die nebenstehend abgebildete, werden nach Pegelvorschrift (*LAWA 1997*) ausgewählt und unterhalten, die u.a. verlangt, dass der Fließvorgang konstant, gerade und rückstaufrei ist. Diese Einschränkungen, die für die Ermittlung von Durchflüssen aus Wasserständen sinnvoll waren, verhinderten oftmals die Einrichtung von Messstellen an hydrologisch relevanten Orten (wie z.B. der Mündung) und zwingen zu einer sehr naturfernen Unterhaltung des Pegelabschnitts.



Pegel Lorsch an der Weschnitz

Durch die Ausrüstung von Pegeln mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeitsmesseinrichtung ist zunächst die Rückstaufreiheit nicht mehr für die Durchflussbestimmung zwingend erforderlich.

2 Durchflussmessung / Kalibrierung

Für die kontinuierliche Durchflussmessung werden verschiedene Messverfahren eingesetzt, die der Strömung auf unterschiedliche Weise eine Geschwindigkeitsinformation entnehmen. Radarsensoren, die über der Wasseroberfläche angebracht sind, messen die Geschwindigkeit an einer kleinen Fläche (Punkt) des Wasserspiegels. Ultraschallanlagen nach dem Laufzeitprinzip ermitteln die Geschwindigkeit entlang des Messpfades zwischen zwei Schallwandlern. Für die hier durchgeführte Betrachtung ist es von Bedeutung, dass Ultraschall-Laufzeitanlagen über den längsten Messpfad integrieren. Radarsensoren liegen am anderen Ende der Skala, weil sie den kleinsten Messpunkt haben. Im praktischen Einsatz sind zudem noch hADCP-Sensoren, die die Fließgeschwindigkeit über ein kleineres Volumen integrieren. Sie liegen daher zwischen den beiden anderen Typen und werden hier nicht gesondert betrachtet.

Allen kontinuierlich arbeitenden Sensoren gemeinsam ist es, dass es ihnen nicht gelingt, das Geschwindigkeitsfeld komplett zu erfassen, so dass sich aus dem Messsignal allein noch kein Durchfluss berechnen lässt. Der Durchfluss Q ermittelt sich vielmehr aus der gemessenen Geschwindigkeit v_{mess} , der Querschnittsfläche A und dem Kalibrierfaktor k nach der Formel:

$$Q = k \cdot v_{\text{mess}} \cdot A \quad (1)$$

A und k sind Funktionen des Wasserstandes und müssen vorab bekannt sein.

Der k -Wert (Kalibrierfaktor) enthält die Information über die Ungleichförmigkeit des Geschwindigkeitsfelds. Wenn die Geschwindigkeit im gesamten Messquerschnitt konstant wäre, ergäbe sich $k = 1$. Die Bestimmung der k -Werte kann mittels Messungen oder numerischen Simulationen erfolgen, die in der Lage sind, den Durchfluss zu ermitteln und ihn in Zusammenhang mit dem Messsignal zu bringen. Die bisher verwendeten numerischen 2D-Simulationen berechnen das Geschwindigkeitsfeld in der Querschnittsfläche unter der Voraussetzung von Gleichförmigkeit in Fließrichtung.

Bei Kalibriermessungen wird die Geschwindigkeitsverteilung in einem feinen Messraster über den Querschnitt aufgenommen (Vielpunktmessungen, ADCP-Messung). Dabei liegt die Problematik in der Seltenheit von Hochwasserabflüssen - der Durchfluss eines Extremereignisses nach Gleichung (1) kann nur bestimmt werden, wenn für diesen Wasserstand der k -Wert bereits durch eine Kalibriermessung bekannt ist. Aber auch wenn eine Kalibrierung bereits vorliegt,

muss vorausgesetzt werden, dass sich die Querschnittsfläche und die Geschwindigkeitsverteilung in der Zwischenzeit nicht verändert haben.

3 Pegel Marburg

Der Pegel in Marburg an der Lahn (siehe Abbildung 1) wurde 2005 mit einer Ultraschall-Durchflussmessanlage (Laufzeitprinzip) ausgestattet. Vor der Inbetriebnahme wurde die Messeinrichtung durch eine numerische 2D-Simulation der Geschwindigkeitsverteilung für fünf verschiedene Wasserstände kalibriert.



Abbildung 1: Pegel Marburg, Blick vom linken Ufer nach oberstrom

Zwei Besonderheiten traten dabei auf, die von einer zweidimensionalen Betrachtung nicht voll zu erfassen sind:

1. Die Geschiebeführung der Lahn führt zu einer morphodynamischen Veränderungen der Sohlage. Auch im Pegelquerschnitt bilden sich Kiesbänke. Die in Abbildung 2 gezeigte Kiesbank war kurz vor der Einrichtung der Durchflussmessanlage herausgebaggert worden.
2. Wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, sind die Böschungen der Lahn oberstrom des Pegelquerschnitts mit Büschen und Gehölzen bewachsen. Entsprechend zeigen die im Hochwasserfall durchgeführten ADCP-Messungen

der Geschwindigkeitsverteilung (vgl. Abbildung 3) eine Geschwindigkeitsdelle vor allem im Bereich der rechten Böschung.

Diese naturnahen Gewässerstrukturen sind weder untypisch noch besonders extrem. Andere Gewässer weisen zum Teil eine weitaus lebendigere Morpho- und Vegetationsdynamik auf.

Daher sind im folgenden die beiden Einflüsse auf die Geschwindigkeitsverteilung und damit auf den Kalibrierfaktor durch eine 3D-Simulation erfasst worden.

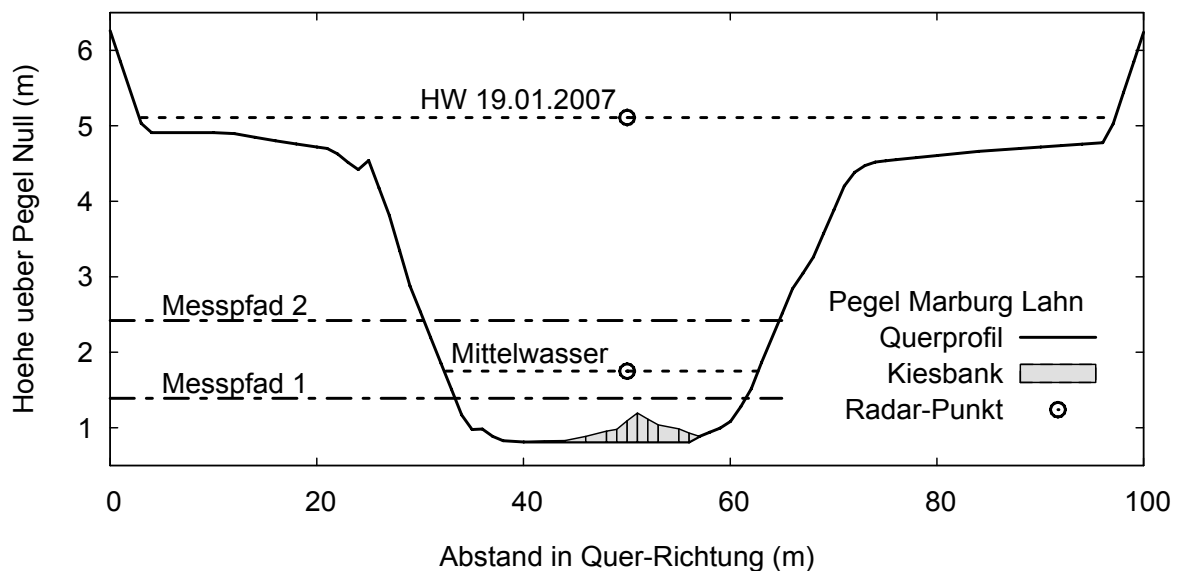


Abbildung 2: Querschnitt Lahn-Pegel Marburg mit den Höhen der realen Ultraschallanlage und den fiktiven Radar-Messpunkten

4 3D-Strömungssimulation mit casu

Für die hydrodynamisch-numerische Simulation ist die Software **casu** verwendet worden. Der numerische Algorithmus, der die 3D-Flachwassergleichungen löst, basiert auf den von *Casulli und Cheng (1992)* entwickelten Ansätzen und wurde von *Wyrwa (2003)* neu codiert und erweitert. Numerisch handelt es sich um ein Mischverfahren, das eine Finite-Volumen-Betrachtung der Kontinuitätsgleichung mit einer Euler-Lagrange-Methode für die Konvektion und einer Finite-Differenzen-Diskretisierung für die Reibung kombiniert. Implizite bis semi-implizite Orts-Zeitschritt-Koppelungen sind einstellbar. In der praktischen Anwendung ist der numerisch sehr stabile Watalgorithmus von Bedeutung.

Das horizontale Berechnungsnetz kann aus beliebig geformten Drei- und Vierecken bestehen. Vertikal wird das Berechnungsvolumen in waagerechte Schichten unterteilt. Die Fließwiderstände der Sohlrauheiten und des Großbewuchses werden in Anlehnung an das im *DVWK Merkblatt 220 (1991)* beschriebene Verfahren berechnet, bei dem für die Sohle die äquivalente Sandrauheit k_s und für den Großbewuchs der Durchmesser d_p und die Abstände a_x , a_y verwendet werden.

Für die Simulationen am Pegel Marburg ist ein schematisches rechteckiges Modellgebiet von 200 m Länge und 100,5 m Breite auf der Basis des Pegelquerschnitts erstellt worden. Das Berechnungsnetz besteht aus Vierecken von 4 m Länge in Fließrichtung und 1 m Breite. Horizontal ist der Wasserkörper in der knapp 1 m tiefen Mittelwassersituation in 33 Schichten mit Abständen von 0,025 m bis 0,05 m unterteilt und in der gut 4 m tiefen Hochwassersituation in 37 Schichten mit Abständen von 0,05 m bis 0,20 m. Das Ufergebüsch endet 40 m oberstrom des Pegelquerschnitts.

5 Vergleich Messung – Simulation

Als Vergleichsmöglichkeit für die hier durchgeführten 3D-Simulationen des Geschwindigkeitsfeldes wurden vom Regierungspräsidiums Gießen dankenswerterweise ADCP-Messungen während zwei Hochwassereignissen zur Verfügung gestellt. Abbildung 3 (oben) zeigt die Geschwindigkeitsverteilung der ADCP-Messung im Hochwasserfall vom 21. Januar 2005 (WSP=5,04 mü.PN).

Diese Messung enthält - ähnlich einer Momentaufnahme - noch die turbulenten Schwankungsbewegungen. Sie ist mit dem Ergebnis der in Abbildung 3 (unten) gezeigten Simulation, in der die turbulenzgemittelten Geschwindigkeiten berechnet wurden, daher nur qualitativ vergleichbar. Gut erkennbar sind in beiden Darstellungen die Nachläufe des Bewuchses der Uferböschungen bis in den Pegelquerschnitt hinein.

Ein weiteres Hochwasser vom 19. Januar 2007 erreichte mit 5,11 mü.PN fast den gleichen Wasserstand wie das Ereignis zwei Jahre zuvor. Die ADCP-Geschwindigkeitsmessungen wurden sowohl über mehrere Querfahrten, als auch über die Wassertiefe zu einem spezifischen Durchfluss integriert und erlauben damit auch einen quantitativen Vergleich mit den Ergebnissen der 3D-Simulation, siehe Abbildung 4.

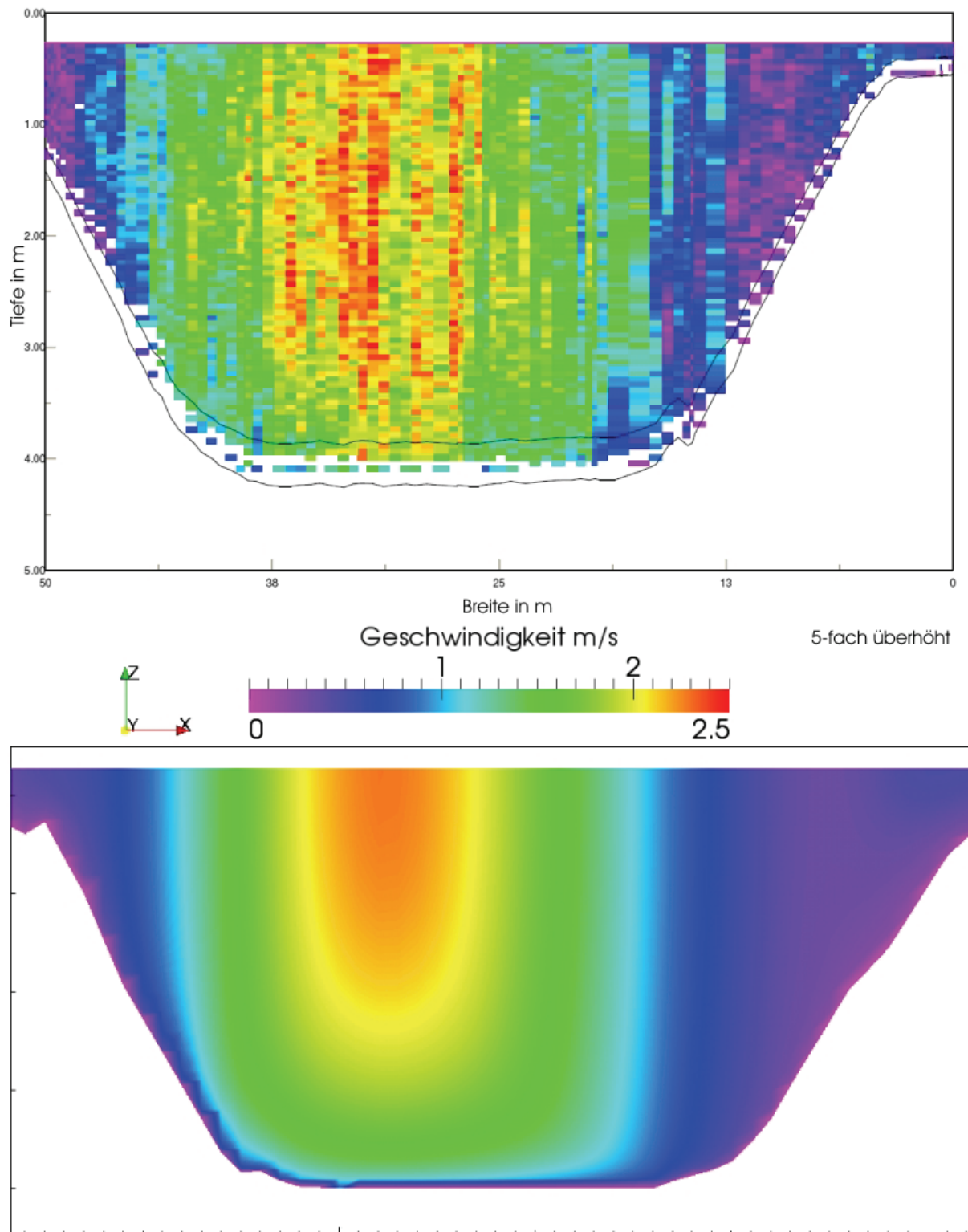


Abbildung 3: Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung von ADCP-Messung (oben) und Simulation casu (unten), Hochwasser Januar 2005.

Zu erkennen ist, dass mit **casu** auf der Grundlage eines 2-Gleichungs- $k\epsilon$ -Turbulenzmodells (k ϵ s), das in der Lage ist, auch die Turbulenzproduktion aus

horizontaler Scherung zu berücksichtigen, sowohl die Durchflussaufteilung über den Querschnitt als auch die Lage des Maximum des spezifischen Durchflusses sehr gut wiedergegeben wird.

Die Differenz beim Gesamtdurchfluss zwischen Messung ($198 \text{ m}^3/\text{s}$) und Simulation ($206 \text{ m}^3/\text{s}$) beträgt lediglich $8 \text{ m}^3/\text{s}$.

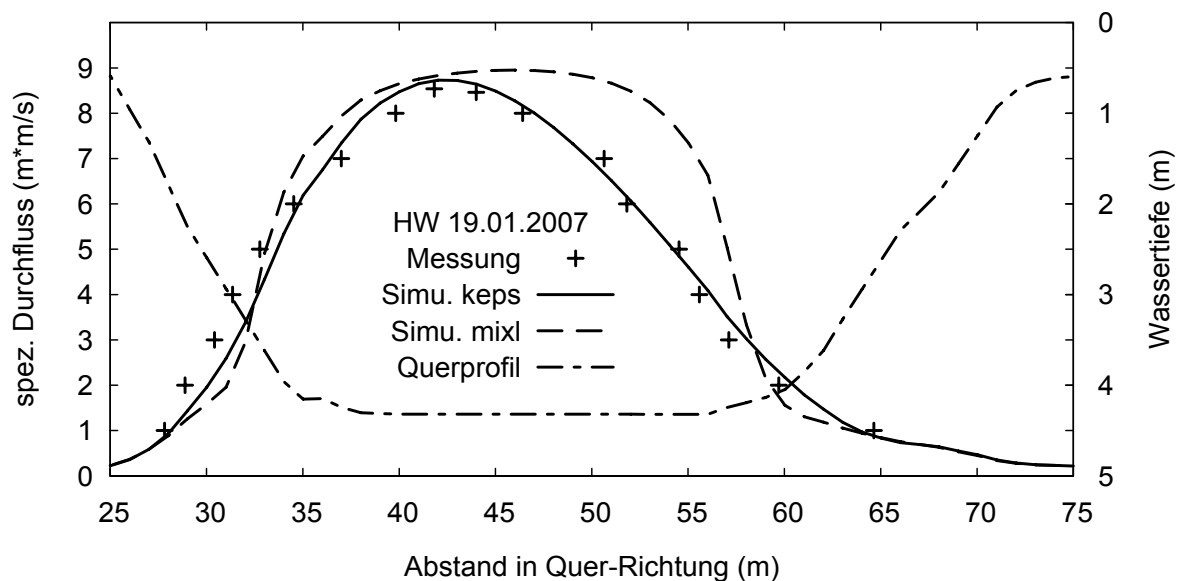


Abbildung 4: Vergleich der tiefenintegrierte Geschwindigkeiten zwischen Messung und Rechnung

Das in Abbildung 4 ebenfalls dargestellte Ergebnis einer Simulation mit dem einfacheren Mischungs-Weg-Turbulenzmodell (mixl), das den turbulenten Impulsaustausch allein über die vertikale Scherung ermittelt, zeigt, dass sich mit diesem Ansatz die Durchflussaufteilung über den Querschnitt nicht zutreffend berechnen lässt.

6 Auswirkung von Ufergebüsch

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die Leistungsfähigkeit der hydronumerischen 3D-Simulation mit **casu** durch Messungen bestätigt, so dass nun zum Einen der Einfluss von Bewuchs und im folgenden Kapitel der Einfluss von Querschnittsänderungen auf die Geschwindigkeitsverteilung und damit auf den Kalibrierfaktor näher untersucht werden kann.

Abbildung 5 zeigt die in der Simulation (Kapitel 5) angesetzte Lage des Buschwerks (linkes Ufergebüsch $d_p = 0,10\text{m}$ $a_x = a_y = 2,0\text{ m}$, rechtes Ufergebüsch $d_p = 0,05\text{ m}$ $a_x = a_y = 1,0\text{ m}$), das 40 m vor dem Pegelquerschnitt endet. Abbildung 6 zeigt diese Büsche wenige Tage nach dem Durchgang des Hochwassers vom Januar 2005, was am Geschwemmsel noch gut erkennbar ist.

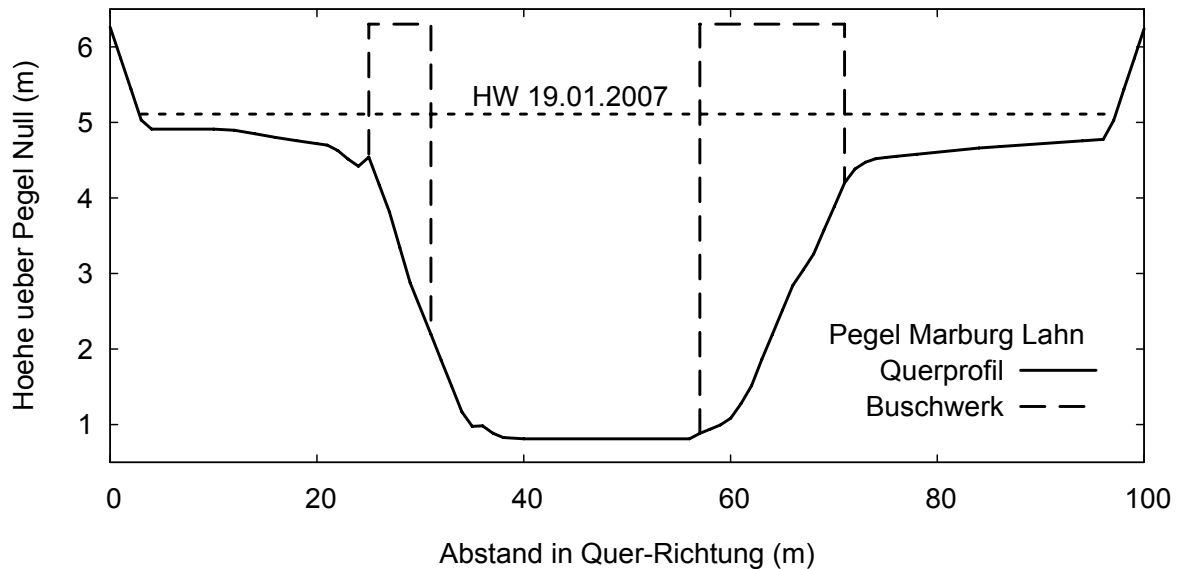


Abbildung 5: Lage des Buschwerks im Querschnitt



Abbildung 6: Pegel Marburg, Blick vom rechten Ufer nach Oberstrom

Würde das Buschwerk auf den Böschungen gerodet oder in einer 2D-Simulation vernachlässigt, kann mit einer erneuten 3D-Simulation die Geschwindigkeit be-

rechnet werden, die die Ultraschallanlage in diesem Fall im jeweiligen Messpfad messen würde. Zusätzlich ist auch das Messsignal einer fiktiven Radar-Messeinrichtung (vgl. Abbildung 2) für das Hochwasserereignis vom 19.01.2007 ermittelt worden.

Da aus der Simulation ebenfalls die Querschnittsfläche und der Gesamtabfluss bekannt sind, können die jeweiligen Kalibrierfaktoren (k-Werte) mit und ohne Gebüsch berechnet werden, die in der folgenden Tabelle 1 zusammengestellt sind.

Tabelle 1: Einfluss des Ufergebüsches auf die Durchflussmessung

k-Wert	Ultraschall Pfad 1	Ultraschall Pfad2	Radar Oberflächenpunkt
Mit Gebüsch	0,901	0,847	0,663
Ohne Gebüsch	1,086	0,905	0,735
Unterschied Q	20 %	7 %	11 %

Der Vergleich zeigt, dass das Ufergebüsch einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die k-Werte und damit auf das Ergebnis der Durchflussmessung hat.

7 Auswirkungen von Querschnittsänderungen

Analog ist weiterhin die Auswirkung einer Querschnittsänderung auf das Messergebnis, hier am Beispiel der in Abbildung 2 gezeigten Kiesbank für eine Mittelwassersituation mit knapp 1 m Wassertiefe, untersucht worden. Die Auswertung der **casu**-Simulationsergebnisse für den Ultraschall-Messpfad 1 und einen fiktiven Radarpunkt (vgl. Abbildung 2) ist in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2 Einfluss der Morphodynamik auf die Durchflussmessung

	Ultraschall-Pfad 1	Radar-Punkt	Querschnittsfläche (m ²)
ohne Kiesbank	k=0,915	k=0,846	25,2
mit Kiesbank	k=0,929	k=0,904	22,9
Unterschied Q	-8 %	-3 %	

Die Abweichungen im Durchfluss resultieren hier nicht allein aus der Änderung der k-Werte, sondern auch auf der Änderung der Querschnittsfläche.

8 Fazit

Wenn der Zustand eines Gewässerabschnitts, in dem kontinuierliche Durchflussmessungen durchgeführt werden, von dem abweicht, der bei der Kalibrier-Messung gegeben oder bei der Kalibrier-Simulation vorausgesetzt war, können signifikante Fehler bei der Durchflussbestimmung auftreten. Dies zeigen die Ergebnisse vergleichender 3D-Simulationen mit **casu** am Beispiel von zwei typischen Gewässerelementen, einer Kiesbank und einem Ufergebüsch, für die am Beispiel des Pegels Marburg an der Lahn die Unterschiede im „Messwert“ quantifiziert worden sind.

Die hydronumerische 3D-Simulation eröffnet damit zwei grundsätzlich neue Möglichkeiten:

1. Die morphodynamischen Veränderungen an einer Messstelle müssen nicht baulich korrigiert werden. Durch Übernahme der Veränderungen in das numerische Kalibriermodell kann die Durchflussmessung nachkalibriert werden.
2. Der Gewässerabschnitt, in dem die Durchflussmessung vorgenommen wird, muss nicht in die eine gradlinige Form gebracht werden, die herkömmliche 2D-Kalibrierverfahren voraussetzen, sondern auch naturnahe Abschnitte können mittels 3D-Simulationen erfasst werden.

Damit werden also künftig auch Durchflussmessungen z.B. an dem nebenstehend gezeigten Gewässergüte-Messpfahl in der Nidda-Mündung bei Frankfurt am Main möglich sein, in dem der Einfluss von Bewuchs und der oberhalb gelegenen Flusskrümmung mit Hilfe einer 3D-Simulation bei der Bestimmung der Kalibrierfaktoren berücksichtigt wird.



9 Literatur

Casulli, V.; Cheng, R.T. (1992):

Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow
Int. J. Num. Meth. Fluids, Vol. 15, pp 629-648

DVWK Merkblatt 220 (1991):

Hydraulische Berechnung von Fließgewässern

Merkblätter 220 des Deutschen Verbandes für Wasser- und Kulturbau e.V.

LAWA (1997):

Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Pegelvorschrift Stammtext

Wyrwa, J (2003).

Turbulenzmodellierung für stabil dichtegeschichtete Strömungen bei der Simulation des
Transports von kohäsiven Sedimenten in Ästuaren

Diss. TU Berlin

Autoren:

Dr.-Ing. Jens Wyrwa

Dr.-Ing. Frank Schumacher

Dr. Schumacher

Ingenieurbüro für Wasser und Umwelt

Büro Frankfurt

Königsteiner Straße 12

65929 Frankfurt am Main

Dr. Schumacher

Ingenieurbüro für Wasser und Umwelt

Südwestkorso 70

12161 Berlin

Tel.: +49 69 94 50 89 98

Tel.: +49 30 262 329 - 90

E-Mail: wyrwa@wasserundumwelt.de

E-Mail: schumacher@wasserundumwelt.de